

## 白山砂防管内における斜面崩壊の3次元安定解析による斜面安定性評価

阿部淳一※ 田中康博 (応用地質株式会社)

甚田隆光 杉崎亮太 (国土交通省北陸地方整備局 金沢河川国道事務所)

キーワード：三次元安定計算 斜面安定性評価

## 1. はじめに

当該地域は、手取川水系尾添川支流中ノ川（以下、「中ノ川流域」と称する）に位置している（図1）。中ノ川流域では、2021年4月に斜面崩壊が確認され、これに伴って主要地方道の一区間が崩落していた。中ノ川流域は、手取川水系の中でも白山火山堆積物に起因する不安定な土砂生産が多い流域であり、これまで計画的に砂防事業として砂防設備の整備が進められてきた。今後も流域全体の土砂災害リスクの低減を目的に、継続的な砂防設備の整備が必要とされている。

2021年4月の斜面崩壊の確認以降、崩壊地上流域において砂防事業が推進されている。一方、斜面崩壊とともに被災した主要地方道は、今後も砂防事業を進めるうえで交通機能を担う重要な路線であり、その安全な利用を確保するために、崩壊斜面の安定性を継続的に評価することが不可欠であった。



図1 白山砂防管内-崩壊位置

## 2. 崩壊斜面の概要

斜面崩壊は、高さ約300m、幅約190mにおよぶ大規模なものである。主要な崩壊は上部斜面から発生し、崩壊土砂は下部斜面および河床にかけて堆積した。一方、斜面内部には崩壊に至らなかった土塊が残存している。これらの土塊については、今後移動する可能性を有する土砂の範囲としてBブロックおよびCブロックが定められており、ボーリングコア状況によりそれぞれ深部Bブロックと浅部Cブロックが追加で定められた（図2）。斜面上に残存する土塊は、両側部を谷地形によって規定されている。当該斜面では地形侵食が著しく、崩壊以降、谷部においては年間約5cmの速度で侵食が進行しており、Cブロック、浅部CブロックおよびBブロックは影響を受けている。谷部侵食に伴う残存土塊側部形状の変化は、斜面の安定性に大きな影響を及ぼすと考えられる。このため、事業を進めるうえでは、残存土塊

の側部形状や地形変化が斜面の安定性および安全率に与える影響を把握する必要があると考えられる。



図2 崩壊当時の空中写真とブロック範囲

## 3. 三次元安定計算の概要

斜面の安定性評価の手法のひとつとして、斜面の安定計算が広く使われている。しかし、前述のような地形条件下では、代表断面を用いた従来の二次元斜面安定計算では、側形状や地形の三次元的な影響を十分に反映できず、安定性を適切に評価できない可能性がある。そのため、斜面全体の地形形状や側部条件の変化、断面効果を考慮可能な三次元斜面安定解析を適用するものとした。

三次元安定計算の概要を以下に述べる。計算式は三次元簡易ヤンプ法である。三次元簡易ヤンプ法は、すべり土塊を複数の柱状要素（コラム）に分割し、全体の力の釣り合い条件から安全率を算定する手法であり、側部摩擦の効果を考慮した三次元的な安定性評価が可能なものである。各柱状要素について、すべり面に作用する抵抗力および滑動力を算出し、それらを斜面全体で集約することで斜面の安全率を定めている。

## 4. 三次元安定計算の条件

安定計算には、五大開発株式会社製の三次元斜面安定計算ソフトウェア「SSA3D」を用いた。

計算モデルは、Bブロックおよび深部Bブロック、Cブロックおよび浅部Cブロックを設定し、計4モデルとした（図3）。

土質定数について、土塊の単位体積重量は、地すべり土塊の一般的な値を参考に  $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$  とした。すべり面の強度定数については、BブロックおよびCブロックを対象として、崩壊確認時の初期安全率を  $F_s = 0.95$  と仮定して逆算を行った。逆算は、地下水面が形成されている条件および形成されていない条件のそれぞれについて、粘着力  $c$  を固定した場合と内部摩擦角  $\phi$  を固定した場合の複数ケースを設定して実施した。逆算により得られたすべり面強度定数を、別途実施した室内試

験による繰り返し一面せん断試験の残留強度と比較した結果、有効応力状態を仮定した場合よりも、全応力状態を仮定した場合の逆算結果の方が試験結果に近い値を示した。また、別途実施している観測結果によれば、地下水位は全体として低く、最高水位においてもすべり面より約 0.6m 高い位置にとどまっており、崩壊確認以降、降雨に伴う地下水位の急激な上昇は発生していない。これらの結果を総合すると、本崩壊は地下水の影響が小さい条件下で発生した崩壊形態であった可能性が高いと判断される。このため、崩壊後 2 年目以降の安定計算では、地下水位面を考慮しない条件と設定し、初年度に全応力条件下で逆算した複数のすべり面強度定数の組合せ（表 1）を用いて順計算を実施することとした。なお、深部 B ブロックおよび浅部 C ブロックは 2 年目から解析対象に追加されているが、その後の動態観測において新たな変動を示唆する結果は認められていない。このことから、3 年目以降の解析では、地形モデルならびに地形侵食に伴うすべり面形状の変化を反映したモデルを用い、経年的な斜面安定性の比較を実施することとした。

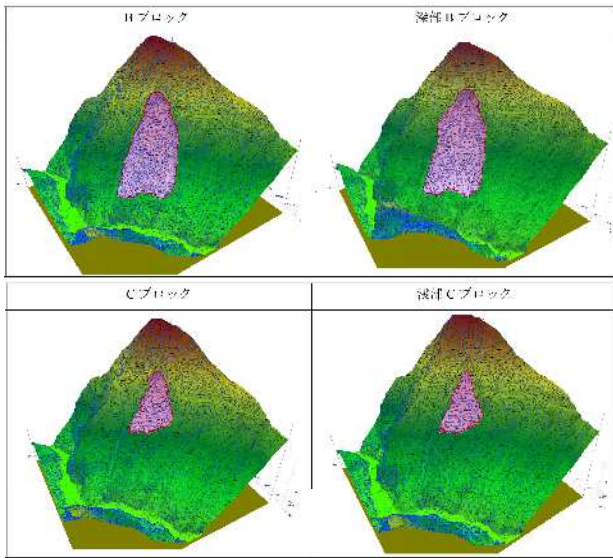


図 3 計算モデル（上：Bブロック下：Cブロック）

表 1 すべり面強度定数一覧

Bブロック逆算強度定数,  $F_s = 0.95$ , 全応力条件

C固定		φ固定		
C=25kN/m <sup>2</sup> , φ=35.6181°	C=69.30kN/m <sup>2</sup> , φ=25°	C=49.70kN/m <sup>2</sup> , φ=30°	C=27.89kN/m <sup>2</sup> , φ=35°	C=3.13kN/m <sup>2</sup> , φ=40°

Cブロック逆算強度定数,  $F_s = 0.95$ , 全応力条件

C固定		φ固定		
C=25kN/m <sup>2</sup> , φ=30.7332°	C=40.63kN/m <sup>2</sup> , φ=25°	C=27.11kN/m <sup>2</sup> , φ=30°	C=11.99kN/m <sup>2</sup> , φ=35°	C=0kN/m <sup>2</sup> , φ=38.5498°

5. 三次元安定計算結果

三次元安定解析により算出した各ブロックの安全率の経年推移を図 4 に示す。前述の条件下における安全率は、いずれのブロックにおいても概ね  $F_s = 0.95 \sim 1.05$  の範囲で推移しており、年度や強度定数の設定によって変動が認められる。B ブロックでは、年度によって安全率の上下が比較的大きく、特に一部の強度定数条件においてはその変化が大きい傾向が見られた。一方、深部 B ブロックの最大安全率は B ブロックより大きい値を示し、経年的にも大きな変動は確認されおらず、内部摩擦角が大きいほど安全率が大きい特徴を有する。C ブ

ロックにおいては、安全率の変動が比較的明瞭であるのに対し、浅部 C ブロックでは安全率は概ね安定した推移を示している。C ブロック、浅部 C ブロックは粘着力が大きいほど安全率の上昇が大きくなる傾向が近年見取れる。



図 4 各ブロックにおける安全率の推移グラフ

6. 三次元安定計算による斜面の安定性評価

安定計算の結果は、ブロックごとの侵食状況や地形条件に応じて異なる安定特性を示しており、その進行状況が安全率の変化として表れていることが示唆された。側部侵食の進行が確認されている C ブロックおよび浅部 C ブロックでは、強度定数の設定に応じて安全率の変化傾向に差が認められた。内部摩擦角を大きく設定した条件においては、安全率の増加は近年大きくならない傾向が確認された。一方で、粘着力を大きく設定した条件では、相対的に高い安全率が算出されており、側部形状の変化に伴い、すべり土塊の側部摩擦条件が変化している状況が、三次元安定計算による安全率の結果に反映されていると考えられる。B ブロックにおいては、C ブロックおよび浅部 C ブロックほど顕著ではないものの、侵食に伴う側部形状の縮小が進行しており、2024 年から 2025 年にかけての計算結果では、粘着力を大きく設定した条件で相対的に高い安全率を示す傾向が現れ始めている。これに対して、側部侵食の影響が小さい深部 B ブロックでは、内部摩擦角の値が大きいほど安全率が高くなっており、側部摩擦力が比較的保たれた地形条件下にあることが示唆された。

以上より、谷部侵食に伴う残存土塊側部形状の変化が、三次元安定計算で算出された安全率の変化として捉えられ、斜面の安定性に与えている影響を確認することができた。現況においては、各ブロックの安全率はいずれも概ね初期安全率より上昇しており、直ちに大規模な不安定化を示す状態にはないと評価される反面、側部侵食が顕著なブロックは、今後も侵食が継続した場合、不安定化に転じる可能性や安定性の向上が望めない状況になる可能性を有している。

三次元安定計算により算出した安全率の変化傾向を地形侵食の進行形態と組み合わせることで、現況における斜面の安定状態を推定することが可能である。また、今後の地形変化に応じてどのように安全率が変化し得るか推定することで、将来的な地形変化を踏まえた斜面の安定性リスクについて継続的に検討し、把握していくことが重要であると考えられる。